

Hochleistungs-Membran-Bioreaktor mit stark reduziertem Überschussschlammanfall

High Performance Membrane Bioreactor with greatly minimized excess sludge production

Oliver Stark, INNOCHEM Wasser GmbH,
Patenbergsweg 54, D - 26203 Wardenburg, stark@innochem-online.de

Die Bedeutung von Membran Bioreaktoren (MBR) in der biologischen Abwasserbehandlung hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Die Kombination biotechnologischer und verfahrenstechnischer Erfahrungen ermöglichen eine Effizienz- und Qualitätssteigerung bestehender Behandlungstechnologien. Das System bestehend aus Strahlschlaufenreaktoren und einer Cross-Flow-Ultrafiltration zur Biomasseabtrennung wurde hinsichtlich der Überschussschlammproduktion sowie Ablaufqualität über einen Zeitraum von 120 Tagen untersucht. Die mittlere Raumbelastung betrug 10,5 kg CSB/(m³ Tag), die hydraulische Aufenthaltszeit lag bei 88 Minuten und die Trockensubstanzkonzentration variierte zwischen 12,8 und 17,8 g/l. Die Untersuchungen zeigten: eine Sauerstoffnutzung von etwa 80 %, eine BSB-Reduktionsrate von 98 % und eine spezifische Überschussschlammproduktion von 0,032 kg Trockensubstanz pro kg CSB. Die biologische Verbrennung organischer Fracht findet in Strahlschlaufenreaktoren mit hoher Zelldichte zeichnet sich durch eine hohe Sauerstofftransferate aus und daher liegt der Platzbedarf bei lediglich 0,2 m² pro Einwohnerwert.

Schlüsselbegriffe: **MBR, Membran Bioreaktor, Überschussschlammreduktion, Wasserwiederverwendung, kommunales Abwasser, Schiffskläranlage**

Membrane bioreactors (MBR) have gained increasing attention in the field of biological waste water treatment over the past years. Combining microbial processes and process engineering improves the efficiency and quality of existing treatment technologies. MBR system consists of two jet loop reactors with biomass separation by cross-flow ultrafiltration. The system was operated for 120 days in order to examine excess sludge production and treatment performance. Average volumetric load was 10,5 kg COD/(m³ day), hydraulic retention time was 88 minutes and mixed liquor suspended solid (MLSS) concentration ranged between 12,8 and 17,8 g/l. Technical observations were: utilization of oxygen was approx. 80 %, degradation of BOD reached 98 % and excess sludge production was 0,032 kg dry weight per kg COD. The system is characterized by high oxygen transport rate hence footprint requirement is merely 0,2 m² per Population Equivalent.

Key words: **MBR, Membrane Bioreactor, Excess Sludge Reduction, Water Reuse, Municipal Waste Water, Sewage Treatment for Ships**

1. Einleitung

Der größte Windkraftanlagenhersteller Deutschlands, die Firma ENERCON, hat das erste energieoptimierte Spezialfrachtschiff mit Windantrieb gebaut. Das „E-Ship I“ soll die Marktreife moderner Umweltschutztechnologien unter Beweis stellen und wird weltweit das erste Schiff sein, das das Umweltzertifikat „Blauen Engel“ erhält. Im Auftrag von ENERCON wurde eine Abwasserbehandlungsanlage für 40 Besatzungsmitglieder mit minimalem Platzbedarf, sehr guter Ablaufqualität sowie stark reduziertem Überschussschlammanfall konzipiert. Zum Leistungsumfang gehörte die Grundlagenermittlung, die Detailplanung, die Realisierung sowie die anschließende Zertifizierung. Die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Ablaufqualität sowie Betriebssicherheit wurde mittlerweile im Rahmen einer 10-tägigen Untersuchung unter Aufsicht der See Berufsgenossenschaft (See BG) gemäß IMO-Entschließung MEPC 159(55) erfolgreich nachgewiesen.

2. Verfahrensbeschreibung und Vorgehensweise

Das System wurde für die Behandlung von Küchen-, Sanitär- und Fäkalabwasser einer vierzigköpfigen Besatzung mit einem täglichen spezifischen Abwasseranfall von 150 Liter pro Einwohner (EW) und einer BSB-Tagesfracht von 60 g pro EW ausgelegt. Die Abwasserbehandlungsanlage besteht aus den folgenden Elementen (siehe Bild 1):

- (1) Feinrechenanlage (Lochweite: 2 mm, hydraulischen Kapazität: 5 l/s)
- (2) Pufferbehälter zum Ausgleich quantitativer sowie qualitativer Schwankungen (Volumen: 2,4 m³)
- (3) Hochleistungsflotation zur Abtrennung ungelöster Abwasserinhaltsstoffe (Oberfläche: 0,263 m², Sättigungsvorgang bei 2 bar Druck, TS-Gehalt des Flotats: 50-60 g/l)
- (4) Zwei Bioreaktoren (Volumen jeweils 220 Liter, TS-Gehalt Biomasse 15-20 g/l, vorbehandeltes Abwasser wird gemeinsam mit Druckluft und dem Rücklaufschlamm eingedüst)
- (5) Ultrafiltrationsstufe im Semi-Crossflow-Betrieb zur Biomasseabtrennung (Membranfläche 11 m²; Überströmungsgeschwindigkeit 2,5 bis 3 m/s)
- (6) Ablauf-Speicher für Druckwassersättigung und Membran-Reinigung (Volumen: 0,2 m³)

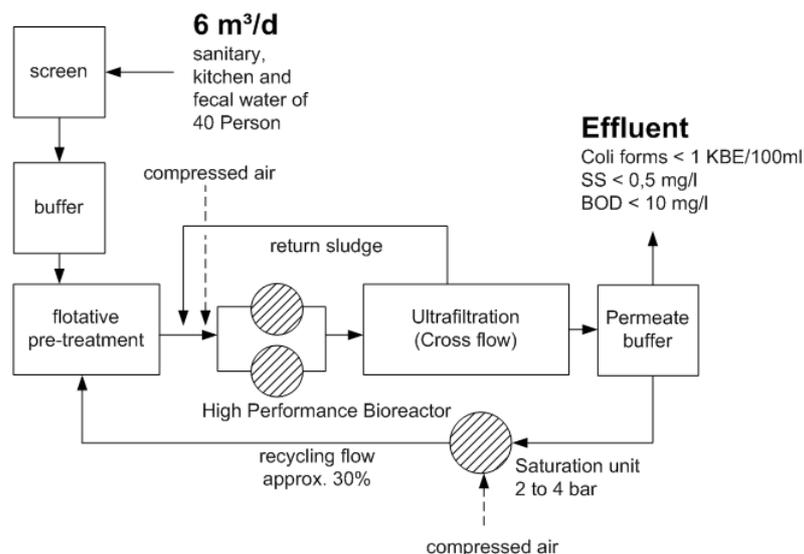


Bild 1 Verfahrensablauf der Abwasserbehandlungsanlage

Im Frühjahr sowie Sommer 2009 wurde die Abwasserbehandlungsanlage auf dem Gelände einer kommunalen Kläranlage (KA) bei Oldenburg eingefahren, ausgetestet, optimiert und auf das 10-tägige

Zertifizierungsverfahren unter Aufsicht der See BG vorbereitet. Die Ergebnisse der erfolgreichen Typenzulassung durch die See BG werden hier nicht weiter thematisiert. Nachfolgend werden die Ergebnisse des etwa 3-monatigen Testbetriebs vor dem Zertifizierungsverfahren beschrieben.

Betriebsbedingungen:

- Abwasservolumenstrom (konstant 7,2 m³/d bzw. 300 l/h, 15 % über Bemessungswert)
- kommunale Abwasser wurde nach dem Sand- und Fettfang der KA entnommen
- Probenahme erfolgte als gekühlte 24h-Mischprobe im Ablauf der Flotation (Zulauf Bioreaktoren) sowie dem Ablauf der Ultrafiltration
- Druckluftmenge wurde mit Turbinenradmessung manuell überwacht (nicht temperaturkorrigiert)
- Rücklaufschlammmenge (RS) zwischen 800 und 1.200 l/h automatisch angepasst an Druckverhältnisse in den Membranmodulen, um konstanten Flux von etwa 37 l/(m² h) aufrechtzuerhalten
- Mittlere Aufenthaltszeit in Bioreaktoren 88 Minuten
- zusätzlich 2 bis 3 Mal pro Stunde ausgetauscht des Reaktorvolumen durch RS
- Messung Trockensubstanzgehalt in Bioreaktoren kontinuierlich mit optischer Messsonde (wöchentliche Kontrollmessung im Labor)
- CSB-Bestimmung mittels Küvettentests vor Ort
- Bestimmung BSB, Keime sowie Abfiltrierbare Stoffe (AFS) durch externes Labor
- Abwassertemperatur lag zwischen 12 und 26 ° C
- Primärschlamm täglich entnommen (40 bis 60 Liter, TS-Gehalt von etwa 50 bis 60 g/l)
- Entnahme von Überschussschlamm (ÜSS) alle fünf Tage 20 Liter auf Retentatseite der Ultrafiltration
- TS-Bestimmung ÜSS aus aufgerührter Probe im Kläranlagenlabor

3. Eingesetzte Technologien

3.1 Hochleistungsflotation im Niederdruckbereich als Vorklärung

Die Druckentspannungsflotation (DAF, Dissolved Air Flotation) ist ein etabliertes Verfahren zur Fest-Flüssig-Separation. Unter Druck eingebrachte Luft wird bei anschließender Druckminderung auf Atmosphärendruck ausgegast. Die frei werdende Luft bildet feinste Blasen im Mikron-Bereich, steigt auf und bildet Agglomerate mit den Feststoffen. An der Oberfläche werden die Feststoffe abgeschöpft und am Boden des Flotationsbeckens wird über eine Tauchwand das geklärte Wasser abgezogen. Nachfolgend sind die Eigenschaften der Hochleistungsflotation im Niederdruckbereich dargestellt [1], [2]:

- Hochleistungsflotationen arbeiten im Niederdruckbereich mit einem Sättigungsdruck von 2 bis 4 bar.
- Hochleistungsflotationen erreichen einen Sättigungsgrad von ca. 100 %.
- Hochleistungsflotationen arbeiten in einem sehr engen Blasenspektrum von 30 bis 50 µm.
- Hochleistungsflotationen arbeiten (auch hier) überwiegend ohne Flockungshilfsmittel.

3.2 Ultrafiltration zur Biomasseabtrennung

Im vorliegenden Fall erfolgt die Biomasseseparation mit Hilfe einer trocken aufgestellten Ultrafiltration, man spricht in diesem Zusammenhang von Membranbioreaktoren (MBR).

Unabhängig von der Qualität des zu behandelnden Abwassers benennen [3] die folgenden Vorteile des MBR-Verfahrens: hohe Qualität des Permeats, Keim- sowie Feststofffreier Ablauf, geringer Platzbedarf,

hohe Raumbelastung, hohe Abbauraten und geringe Überschussschlammproduktion. Mit dem MBR ist es möglich hohe Schlammkonzentrationen unabhängig von den Sedimentationseigenschaften zu beherrschen. Nachteile liegen insbesondere in den höheren Investition- und Betriebskosten (Energie, Betreuung, Membranwechsel, Reiniger) sowie der technischen Komplexität. Man unterscheidet getauchte und trocken aufgestellte Systeme.

Getauchte Systeme im Dead-End-Betrieb werden direkt in die Belebung oder ein externes Filtrationsbecken eingehängt. Mittels einer Pumpe wird das Filtrat mit 0,05 bis 0,5 bar abgesaugt. Die Kontrolle der Deckschicht erfolgt durch unzählige kleine Wirbel infolge des Lufteintrags im Fußbereich. Getauchte Systeme erreichen nach [4] einen spezifischen Fluss (Flux) zwischen 15 und 35 l/(m²*h) und weisen einen geringen Energiebedarf von 0,2 bis 0,8 kWh/m³ auf. Die eigene Auswertung der Angebote von 9 Anbietern getauchter Membran-Systeme zeigte, dass für den Permeatabzug bei einem Flux von 16,5 und 25 l/(m²*h) ein Energiebedarf von 0,2 bis 0,6 kWh/m³ angenommen werden muss. Addiert man den Energiebedarf für die zwingend notwendige Belüftung sowie die von den Herstellern vorgeschriebene 3 bis 5-fache Biomasserückführung dazu, ergibt sich ein Energiebedarf von insgesamt 1,8 bis 3,1 kWh/m³.

Die Trocken aufgestellte Querstromfiltration oder Crossflow-Filtration zeichnet sich dadurch aus, dass die aufzubereitende Lösung mit einer Geschwindigkeit von 4-6 m/s tangential am Filtermedium vorbeigeführt wird und sich somit die Filterkuchenschicht nicht unendlich ausbilden kann. Die Crossflowströmung wird durch den Druck einer Pumpe erzeugt. Aufgrund des hohen Strömungsdruckverlustes liegt der Energiebedarf nach [4] bei 5 bis 10 kWh/m³. Die sehr wirksame Deckschichtkontrolle führt zu einem spezifischem Fluss von über 100 l/(m²*h) [4]. Es ist jedoch auch möglich eine Crossflow-Filtration mit einer verringerten Überströmungsgeschwindigkeit von beispielsweise 2,5 bis 3 m/s zu betreiben und einen geringeren Flux von 30 bis 60 l/(m²*h) in Kauf zu nehmen. In diesem Fall vergrößert sich die zu installierende Membranfläche und damit die Investitionskosten. Jedoch reduziert sich hierbei der Energiebedarf auf 2 bis 2,5 kWh/m³. Dieses Semi-Crossflow-Filtration genannte Verfahren kam im vorliegenden Fall zur Anwendung. Der Platzbedarf von Crossflow-Systemen ist deutlich geringer, als bei getauchten Systemen. Darüber hinaus ist der Belebtschlamm im abgeschlossenen Crossflow-System nicht sichtbar.

3.3 Strahlschlaufenreaktoren als biologische Stufe

Die hier als biologische Stufe eingesetzten Strahlschlaufenreaktoren zählen zur Klasse der Gas-Flüssig-Reaktoren ohne bewegliche Einbauten. Die gewünschte Gasblasendispergierung wird durch einen Flüssigkeitsstrahl erreicht. Luftsauerstoff, Flüssigkeit (Abwasser) und Feststoff (Rücklaufschlamm) werden durch eine Zweistoffdüse in den Reaktor eingeströmt, wodurch eine Dispergierung der Gasblasen und starke mechanische Beanspruchung der Mikroorganismen erfolgt. Im Inneren des Reaktors befindet sich ein Leitrohr, durch welches die Gas-Flüssig-Phase nach oben gefördert wird. Im äußeren Ringraum erfolgt die Abwärtsströmung. Die Strömungsführung verhindert Totzonen und sorgt für eine homogene Verteilung frei suspendierter Mikroorganismen sowie ein hohes Turbulenzniveau. Aufgrund der sehr guten Stoffaustauscheigenschaften zwischen Gas- und Flüssigflüssigkeitsphase ist ein optimaler Sauerstoffeintrag gewährleistet [5].

In Strahlschlaufenreaktoren mit entsprechend ausgelegter Zweistoffdüse bilden sich infolge der starken Scherkräfte sehr kleine Flocken mit einer Größe 10 bis 100 µm. [6] erreichten bei einer Verweilzeit von weniger als 1,5 Stunden und einer CSB-Raumbelastung von 6 bis 13 kg/(m³*d) bei einem Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) zwischen 10 und 22 g/l einen CSB-Abbaugrad von über 95 %. Die CSB-Raumbelastung konventioneller Belebtschlammbiologien liegt i. d. R. zwischen 0,5 bis 1,5 kg/(m³*d).

Vorteile des hier eingesetzten Strahlschlaufenreaktors sind:

- gute Gasdispergierung und hoher Sauerstofftransfer (auch bei viskosen Medien) [5], [7],
- gute Mischcharakteristik [8],

- keine beweglichen Einbauten, leichtes Upscaling sowie hohe Turbulenz [9]
- steuerbares Vermischungsverhältnis von Luft und Flüssigkeit,
- sinnvolle Nutzung der Energie aus der Überströmung der Ultrafiltrationsmodule zur Umwälzung der Strahlschlaufenreaktoren,
- und reduzierte Überschussschlammproduktion sowie geringer Platzbedarf.

4. Ergebnisse

4.1 Zulauf- und Ablaufcharakteristik

Der Zulauf zu den Bioreaktoren bzw. der Ablauf aus der Ultrafiltration lässt sich während der 120-tägigen Untersuchung wie folgt charakterisieren:

Tabelle 1 Zulauf zu den Bioreaktoren bzw. der Ablauf aus der Ultrafiltration

Parameter	CSB-Zu	CSB-Zu	CSB-Ab	BSB-Zu	BSB-Zu	BSB-Ab	AFS-Ab	Keime-Ab
Einheit	[mg/l]	[kg/d]	[mg/l]	[mg/l]	[kg/d]	[mg/l]	[mg/l]	[CFU/100 ml]
Anzahl der Datensätze:	120	120	120	120	120	120	26	26
Minimum:	102	0,73	14,5	46	0,33	0,64	0,00	1
Maximum:	1375,5	9,90	63,4	760	5,47	11,52	4,0	4
Arithmetisches Mittel:	641,9	4,62	37,8	345,4	2,49	5,23	1,14	1,85
Standardabweichung:	243,7	1,75	10,8	130,0	0,94	1,98	1,22	0,99
Unteres Quartil:	466,8	3,36	29,9	277,5	2,00	3,88	0,00	1,00
Median:	624,5	4,5	35,5	348,5	2,51	5,04	0,50	1,50
Oberes Quartil:	798	5,75	45,1	431,5	3,11	6,59	2,00	2,75

Die CSB-Konzentration im Zulauf lag im Mittel bei 642 mg/l. Um die Leistungsfähigkeit weiter auszureizen wurde zwischen Tag 82 bis 93 ein kg Zucker täglich und zwischen Tag mittels 94 bis 106 zwei kg täglich in gelöster Form mittels Dosierpumpe kontinuierlich zugegeben. Die tägliche Abwassermenge betrug 7 m³. Die CSB-Fracht zur Biologie lag somit im Mittel bei 4,6 kg/d. Die parallel beschickten Bioreaktoren wurden vorab für eine tägliche CSB-Fracht von 4,8 kg ausgelegt. Die BSB-Fracht zur Biologie lag im Mittel bei 2,5 kg/d. Die Bioreaktoren wurden vorab für eine tägliche BSB-Fracht von 2,4 kg ausgelegt.

Die CSB-Konzentration im Ablauf lag zu jedem Zeitpunkt unter 64 mg/l. Durchschnittlich wurde ein Wert von 37,8 mg/l erreicht. Dies entspricht einer mittleren CSB-Reduktion von 93 %. Die BSB-Konzentration im Ablauf lag zu jedem Zeitpunkt unter 11,5 mg/l. Durchschnittlich wurde ein Wert von 5,2 mg/l erreicht. Dies entspricht einer mittleren BSB-Reduktion von 98 %. In 100 ml Probenvolumen waren maximal 4 fäkalcoliforme Keime nachweisbar. Im Mittel waren 1,85 fäkalcoliforme Keime nachweisbar.

Absetzversuche sowie eine mikroskopische Untersuchung haben gezeigt, dass die Biomasse fast ausschließlich aus freien Bakterien besteht und nicht sedimentiert. Die Konzentration Abfiltrierbarer Stoffe (AFS) im Ablauf lag zu jedem Zeitpunkt unter 5 mg/l. Durchschnittlich wurde ein Wert von 1,1 mg/l erreicht.

Die Betriebsparameter der zwei Bioreaktoren mit einem Volumen von jeweils 220 Litern während der Untersuchungszeitraums lassen wie folgt charakterisieren:

Tabelle 2 Betriebsparameter der zwei Bioreaktoren

Parameter	TS-Gehalt	Druckluft	Druckluft	Raumbelastung	Schlammbelastung
Einheit	[g/l]	[bar]	[m³/d]	[kg CSB/m³ d]	[kg CSB/kg TS]
Anzahl der Datensätze:	120	120	120	120	120
Minimum:	12,8	2,0	21,6	1,7	0,163
Maximum:	17,8	3,0	57,6	22,5	2,864
Arithmetisches Mittel:	15,1	2,5	41,2	10,5	1,177
Standardabweichung:	1,3	0,3	11,3	4,0	0,502
Unteres Quartil:	14	2,3	28,8	7,6	0,866
Median:	15,2	2,5	43,2	10,2	1,119
Oberes Quartil:	16,3	2,7	50,4	13,1	1,441

Die CSB-Raumbelastung wurde im Rahmen der Bemessung ursprünglich auf 8 kg/(m³ d) festgelegt. Während der Untersuchung lag sie im Mittel bei 10,5 kg/(m³ d). Die BSB-Raumbelastung während der Untersuchung lag im Mittel bei 5,7 kg/(m³ d). Die CSB-Schlammbelastung während der Untersuchung lag im Mittel bei 1,18 kg CSB/ kg TS . Der Trockensubstanzgehalt variierte in einem Fenster von 12,8 bis 17,8 g/l. Im Mittel lag der TS-Gehalt bei 15,1 g/l. Mit Hilfe der Belüftungsintensität wurde versucht die Trockensubstanzkonzentration gezielt zu steuern. Die gezielte Steuerung ist vergleichsweise komplex, da die Belüftungsintensität durch die Luftmenge, die Druckverhältnisse in der Zweistoffdüse, die Abwassertemperatur sowie den Gesamtvolumenströmen bestimmt wird. Außerdem entsteht neben der zufließenden BSB-Fracht eine „interne“ organische Belastung des biologischen Systems infolge des Abbaus der Biomasse. Die eingeblasene Druckluftmenge lag im Mittel bei 41,2 m³ pro Tag.

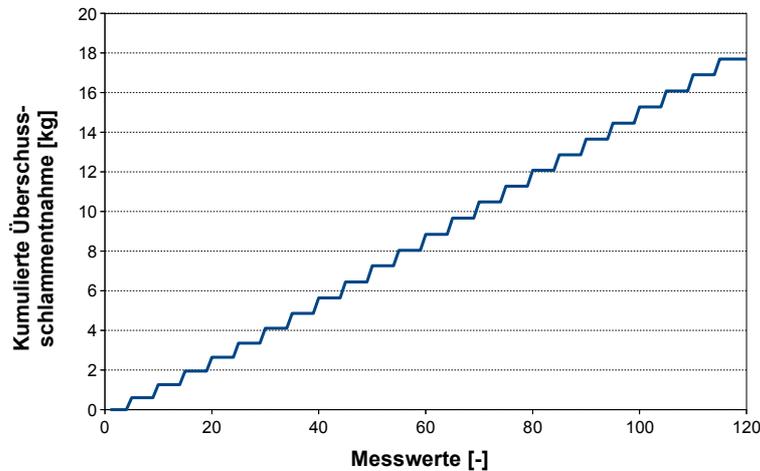


Bild 2 Kumulierte Überschussschlammmentnahmemenge über 120 Tage

Es wurde alle fünf Tage dem System Überschussschlamm (ÜSS) entnommen. Die ÜSS-Menge variierte zwischen 0,6 und 0,8 kg. Bild 2 zeigt die über den Untersuchungszeitraum kumulierte ÜSS-Menge als Trockensubstanz. Es wurden insgesamt 17,7 kg dem System entnommen. Um die gesamte ÜSS-Menge zu bestimmen muss zusätzlich die im System gespeicherte Schlammmenge berücksichtigt werden. Zum Untersuchungsbeginn lag der TS-Gehalt bei 15,5 g/l und am Ende der Untersuchung bei 15,8 g/l. Während der Untersuchung hat sich der TS-Gehalt also um 0,3 g/l erhöht. Multipliziert man die TS-Differenz nun mit dem Systemvolumen von 0,6 m³ ergibt sich eine Schlammmenge von 0,18 kg. Die gesamte im Zeitraum von 120 Tagen entstandene ÜSS-Menge beträgt demnach 17,88 kg.

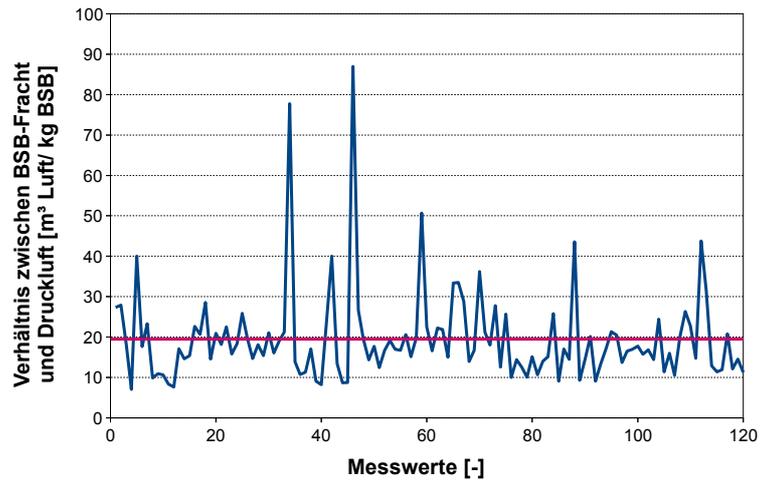


Bild 3 Spezifische Luftzufuhr pro kg BSB-Fracht

Zur Erstellung von Bild 3 wurden die täglichen Druckluftmengen durch die täglichen BSB-Frachten dividiert. Das Verhältnis lag im Mittel bei 19,5. D. h. pro kg BSB-Fracht wurden 19,5 m³ Luft in die Bioreaktoren eingeblasen.

5. Bewertung

Die gefundenen Ablaufkonzentrationen decken sich mit den Erkenntnissen von [10] und erlauben eine erneute Nutzung des Wassers entsprechend der japanischen Richtlinie für die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser [11] bzw. der EU Badewasser Richtlinie (EC/160/75).

Tabelle 3 Erneute Verwendung des gereinigten Abwassers

	gemessen	[10]	[11]
BSB [mg/l]	5,2	< 5	< 3
CSB [mg/l]	38	10 bis 30	k. A.
AFS [mg/l]	1,1	< 2	< 5
Fäkalcoliforme Keime [CFU/100 ml]	1,8	< 20	< 50

Tabelle 4 Vergleich mittleren Betriebsparameter mit einer klassischen Belebtschlammbiologie

	gemessen bzw. errechnet	[12]
CSB-Raumbelastung [kg CSB/(m ³ d)]	10,5	k. A.
BSB-Raumbelastung [kg BSB/(m ³ d)]	5,7	0,25 bis 0,5
CSB-Schlammbelastung [kg CSB/ kg TS]	1,18	k. A.
BSB-Schlammbelastung [kg BSB/ kg TS]	0,28	0,05 bis 0,15
BSB-Ablaufkonzentration [mg/l]	5,2	15
Trockensubstanzgehalt [g/l]	15,1	3,0 bis 5,0
Mittlere Hydraulische Aufenthaltszeit [h]	1,46	7,2 bis 14,4
Volumen für 40 EW [m ³]	0,44	3,33 bis 10
Überschussschlammfall [kg TS/ kg BSB]	0,060	0,7 bis 0,8
Überschussschlammfall [kg TS/ kg CSB]	0,032	k. A.

Die gefundenen Raumbelastungen für Strahlschlaufenreaktoren in der kommunalen Abwasserbehandlung werden von Holler und Trösch [6] sowie Schmitz [13] bestätigt.

Die überschlägig ermittelte Sauerstoffnutzung von etwa 80 % beträgt ein Vielfaches des üblicherweise für feinblasige Belüftungen angenommenen Wertes von 11 % [12].

Die gemessene spezifische ÜSS-Produktion von 0,032 kg TS/ kg CSB überraschte alle Projektbeteiligten. Daher wurde begonnen einen möglichen Messfehler zu finden und es wurden die folgenden Sachverhalte hinterfragt:

- (1) Gibt es eine Möglichkeit das Biomasse unbemerkt das System verlässt? Es konnten keine Leckagen gefunden werden. Durch die Ultrafiltration kann keine Biomasse entweichen bzw. hätten die Messungen der AFS erhöht sein müssen.
- (2) Wurden die ÜSS-Mengen korrekt ermittelt? Das Entnahmegefäß wurde vermessen und entsprach dem Volumen von 20 Litern. Die gemessenen TS-Gehalte des entnommenen ÜSSs entsprachen mit 30 - 41 g/l den theoretischen Schlammkonzentrationen durch Aufkonzentration der Ultrafiltration.
- (3) Wurden die TS-Gehalte in der Biologie als Basis für die Speicherung von Biomasse im System richtig online gemessen? Die Prüfung der Messung im Labor ergab eine Abweichung von ± 10 %.

Literaturrecherchen zeigten, dass andere Autoren ähnliche Beobachtungen gemacht haben: [14] beobachteten, dass bei Belebtschlammkonzentrationen über 40 g/l nur noch etwa 6 % des zugeführten Kohlenstoffs assimiliert werden. [15] kommt bei seinen Ausführungen zu dem Ergebnis, dass Biomassezuwachs und Absterberate sich bei sehr niedrigen Schlammbelastungen nahe 0,01 kg BSB/kg TS*d theoretisch annähern. [16] beobachtete bei Untersuchungen an Membranbelebungsanlagen, dass bei gut vorgeklärtem Abwasser und Schlammbelastungen kleiner 0,04 kg CSB/kg TS*d die ÜSS-Produktion nahezu gegen null geht. Unterschiedliche Mechanismen zur ÜSS-Produktion in MBR-Anlagen werden von [17] sowie [18] verglichen und analysiert. Folgende mögliche Erklärungen für den sehr geringen ÜSS-Anfall wurden, nachdem ein Messfehler ausgeschlossen werden konnte, gefunden:

- (1) **EXTREM GUT GEKLÄRTES ROHABWASSER (VORBEHANDLUNG MIT DAF):** Die ungelösten und teilweise kolloidalen anorganischen sowie organischen Stoffe verbleiben im Primärschlamm. Die gelösten anorganischen Stoffe des zulaufenden Abwassers finden sich nicht als ÜSS wieder, da unter den Bedingungen fehlender Schlammflockenbildung kein „Flockenfilter“ mit entsprechendem Adsorptionsvermögen entsteht und daher passieren anorganische Stoffe die Abwasserreinigungsanlage nahezu ungehindert. Dies trifft nach [14] auch auf Schwermetalle zu, die in klassischen Systemen nahezu unbegrenzt mit dem Primär- und Sekundärschlamm ausgetragen werden. [19] hat die Adsorption von Schwermetallen – getrennt nach Primär- und Überschussschlamm – untersucht und kam zu dem Ergebnis, dass lediglich 6 bis 13 % der ursprünglichen Schwermetallfracht im Zulauf mittels ÜSS dem Wasser entzogen werden.
- (2) **SELTENER ÜBERSCHUSSSCHLAMMABZUG:** Kontinuierlicher Entzug von Biomasse hat zur Folge, dass Organismen mit kurzer Generationszeit dominieren und die Systeme zur so genannten Überkompensation neigen. [20] stellt die These auf, dass in einer kommunalen Kläranlage die biologischen Selbstoptimierungsgrundsätze (vgl. Prinzip des Erhaltungstoffwechsels [21]) durch Eingriffe von außen, insbesondere den Überschussschlamm-Abzug, ständig gestört werden.
- (3) **DISPERGIERUNG DER GASBLASEN, GUTE MISCHCHARAKTERISTIK UND TURBULENZ; ES EXISTIEREN SEHR GUTE STOFFAUSTAUSCH-EIGENSCHAFTEN ZWISCHEN GAS- UND FLÜSSIGPHASE:** Dass ÜSS-Produktion und Sauerstoffversorgung des einzelnen Mikroorganismus korrelieren ist in der Literatur vielfach beschrieben. Die Erhöhung der Sauerstoffkonzentration oder die Verwendung von Reinsauerstoff führt zu einem größeren Sauerstoffpartialdruck, sodass auch die tieferen Schichten der Belebtschlammflocke zunehmend mit Sauerstoff versorgt werden [22, 23, 24, 25]. Somit nehmen auch die inneren Schichten der Belebtschlammflocke am aeroben Abbau teil, die effektive Schlammbelastung sinkt und damit auch der ÜSS-Anfall. [26] zeigten an theoretischen Modellen und praktischen Untersuchungen, dass die Erhöhung der Sauerstoffkonzentration von 2 auf 4 mg/l im Mittel über mehrere Schlammbelastungsbereiche eine um bis zu 18 % geringere ÜSS-Produktion bewirkte.
- (4) **STARKE MECHANISCHE BEANSPRUCHUNG DER MIKROORGANISMEN IN DER ULTRAFILTRATION SOWIE DER ZWEISTOFFDÜSE; DADURCH DE-AGGLOMERIERENDE SOWIE TEILWEISE LYSIERENDE WIRKUNG UND ES ENTSTEHEN KLEINE BIOLOGISCH SEHR AKTIVE FLOCKEN MIT GROSSER OBERFLÄCHE:** Den Einfluss der Flockengröße sowie -gestalt auf die Sauerstoffverfügbarkeit in MBR-Anlagen – getrennt nach getauchten und trocken aufgestellten – Membranen haben auch [27] untersucht. [28] und [27] haben herausgefunden, dass die Diffusionswiderstände in der Belebtschlammflocke sind stark von den Eigenschaften und der Gestalt der Flocken abhängig. Es sind gerade die vom Diffusionswiderstand abhängigen Transportprozesse in bzw. aus der Belebtschlammflocke, die die mikrobielle Stoffumsatzgeschwindigkeit bestimmen. Die Ursache, warum nur ein geringer Teil des Kohlenstoffs assimiliert wird, liegt in folgendem Zusammenhang begründet: Jeder einzelne Mikroorganismus bekommt nur einen Bruchteil vom „Kuchen“ ab und benötigt die darin enthaltene Energie für die Aufrechterhaltung der wichtigsten Zellfunktionen. Im Gegensatz zu konventionellen flocken- oder filmbildenden biologischen Systemen ist im Fall des Strahlschlaufenreaktors mit extensiver Belüftung mittels Zweistoffdüsen unter jedem einzelnen Mikroorganismus auch wirklich „jeder einzelne“ zu verstehen.

Schlussendlich ist wahrscheinlich die Kombination der oben aufgeführten Erklärungen bzw. Mechanismen für den erstaunlich geringen ÜSS-Anfall verantwortlich. In der Literatur findet man mehrere Beispiele von MBR-Anlagen in denen es erfolgreich gelungen ist Teile des Rücklaufschlammes mit Ozon zu lysieren und einen Betrieb mit keiner oder minimaler ÜSS-Produktion über längere Zeiträume aufrecht zu erhalten. [29] beschreiben den Betrieb einer halbertechnischen Belebtschlammanlage mit Ozonbehandlung ohne den Abzug von ÜSS. Auch [30] berichten über den Betrieb einer kommunalen Kläranlage mit einer Zulaufmenge von 450 m³/d die über einen Zeitraum von 9 Monaten ohne den Abzug von ÜSS betrieben wurde. [31] erreichten auf einer kommunalen Kläranlage mit 1000 EW eine Reduktion des ÜSS-Anfalls um 60 % verglichen mit dem Referenzzeitraum. Es zeigte sich hier eine Erhöhung des Sauerstoffbedarfs in der Belegung um 20 bis 30 %.

6. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist eine moderne Abwasserbehandlungsanlage mit minimalem Gesamtplatzbedarf von etwa 0,2 m² /EW, sehr geringem ÜSS-Anfall (0,032 kg TS/ kg CSB), einer Sauerstoffnutzung von etwa 80 %, einer CSB-Raumbelastung von 10,5 kg CSB/(m³ d) und exzellenter Ablaufqualität (BSB = 5,2 mg/l) zu betreiben.

Die geringe ÜSS-Produktion bei gleichzeitig hoher Raumbelastung sowie niedriger Ablaufkonzentration ist auf eine Besonderheit von Strahlschlaufenreaktoren zurückzuführen. Die Oberfläche der Biomasse in Strahlschlaufenreaktoren ist gegenüber konventionellen Verfahren um ein Vielfaches vergrößert und Schadstoffe sowie Sauerstoff können durch den verbesserten Stoffübergang schneller zu den Mikroorganismen transportiert werden. Dies hat hohe Abbauleistungen sowie eine Reduktion der ÜSS-Produktion zur Folge [32].

Darüber hinaus existieren systemische Vorteile wie bedarfsgerechte Kapazitätsanpassung sowie -erweiterung und Fertigung in industrieller Großserie durch modularen Aufbau, stets zuverlässige Biomasseabtrennung unabhängig von Schlammeigenschaften und erneute Nutzung des Wassers ohne zusätzliche Desinfektion. Das System ist für fast jedes biologisch abbaubare Abwasser geeignet. Je höher die Abwasserfracht bzw. je geringer die gleichzeitige hydraulische Belastung desto wirtschaftlicher ist das System realisierbar.

7. Literaturnachweis

[1] STARK, O.; DAMMAN, R.; Neue Erkenntnisse über die Bedeutung des Sättigungsgrads sowie der Blasengröße auf das Betriebsverhalten von Druckentspannungsflotationen, F & S Filtrieren und Separieren, Jahrgang 19, Nr. 6, S. 279-283, 2005.

[2] STARK, O.; DAMMAN, R.; STEIN, A.; Abtrennung von Biomasse mittels Mikroflotation - Zehn Jahre Betriebserfahrungen in St. Wendel, Korrespondenz Abwasser, Abfall (55) Nr. 5, S. 520-526, 2008.

[3] STEPHENSON, T.; JUDD, S.; JEFFERSON, B.; BRINDLE, K.; Membrane bioreactors for wastewater treatment, IWA Publishing London, 2000.

[4] GUTTAU, S.; Beitrag zur Entwicklung, Optimierung und Simulation eines Membranbioreaktors zur Abwasseraufbereitung an Bord von Schiffen, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, S. 40, Sharker Verlag, Aachen, 2005.

[5] BLENKE, H.; Loop reactors, Biochemical Engineering 1, S. 51-59, 1979.

[6] HOLLER, S., TRÖSCH, W.; Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates, Journal of Biotechnology, Volume 92, Issue 2, S. 95-101, 2001.

- [7] STERNAD, W.; Bioreaktoren. In: Chiemel, H. (Hrsg.): Bioprozeßtechnik 1, G. Fischer, Kap. 7, 1991.
- [8] WARNECKE, H.-J.; Macromixing Characteristics of Gas-Liquid Jet Loop Reactors, Acta Biotechnol. 9, Nr. 2, S. 111-121, 1989.
- [9] STORHAS, W.; Bioreaktoren und periphere Einrichtungen, Vieweg Verlag, 1994.
- [10] MELIN, T., JEFFERSON, B., BIXIO, D., THOEYE, C., DE WILDE, W., DE KONING, J., VAN DER GRAAF, J., WINTGENS, T.; Membrane Bioreactor Technology for Wastewater Treatment and Reuse, Integrated Concepts in Water Recycling (2005) -S.J. Khan, A.I. Schäfer, M.H. Muston (Eds) – ISBN 1 74128 082 6, S. 465-477.
- [11] MURAKAMI, T.; CHARACTERISTICS OF MBR IN MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT, Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, Journal Code: L4536A, Vol- No.186; S.163-181, 2004.
- [12] IMHOFF, K.; IMHOFF, K. R., Taschenbuch der Stadtentwässerung, 28. Auflage, Oldenburg Verlag, München/Wien, 1993.
- [13] SCHMITZ, U.; Charakterisierung eines grosstechnischen Schlaufenreaktors zur aeroben Abwasserreinigung, Clausthal-Zellerfeld, Dissertation, 1995.
- [14] MULLER, E. B., STOUTHAMMER, A. H., VERSEVELD, H. W., EIKELBOOM, D. H., Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross flow filtration, Water Research, Vol. 29,S. 1179-1189, 1995.
- [15] CORNEL, P.; Membranbelebung - biologische Abwasserreinigung ohne Anfall von Überschussschlamm?, in Kommunale Klärschlammbehandlung vor dem Hintergrund der neuen europäischen Klärschlammrichtlinie, 61. Darmstädter Seminar Abwassertechnik, Nov. 2000.
- [16] KRAUTH, K.H., Belebungsverfahren ohne Nachklärbecken, in Tagungsband 1. Aachener Tagung Membrantechnik, 1997, IVT und ISA RWTH Aachen.
- [17] RAMAKRISHNA, D. M.; VIRARAGHAVAN, T.; Strategies for sludge minimization in activated sludge process - a review, Fresenius Environmental Bulletin, Volume 14 – No 1., S. 2-12, 2005.
- [18] XING, C.-H.; WU, W.-Z.; QIAN, Y.; TARDIEU, E.; Excess Sludge Production in Membrane Bioreactors: A Theoretical Investigation, J. Envir. Engrg. Volume 129, Issue 4, S. 291-297, 2003.
- [19] ZESSNER, M.; Bedeutung und Steuerung von Nährstoff- und Schwermetallflüssen des Abwassers, Dissertation, TU Wien, erschienen in der Hochschulreihe: Wiener Mitteilungen, Band 157, 1999.
- [20] DORAU, W.; Erfahrungsbericht zum kontinuierlichen Betrieb einer Membranbiologie ohne Überschussschlammabzug, Begleitbuch zur 2. Aachener Tagung Membrantechnik, Institut für Verfahrenstechnik und Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 1998.
- [21] PIRT; The maintenance energy of bacteria in growing cultures. Proceedings of the Royal Society London, 163B, S. 224 – 231, 1965.
- [22] HANSEN, J.; STEINMETZ, H.; ZETTL, U., Betriebsergebnisse zum Einsatz der Reinsauerstoffbegasung zur weitergehenden Stickstoffelimination bei einer Anlage mit Weinbaueinfluss, Abwassertechnik (awt), Heft 2, S. 32 – 36, 1996.
- [23] HEGEMANN, W.; Beitrag zur Anwendung von reinem Sauerstoff beim Belebungsverfahren, Technisch-wissenschaftliche Schriftenreihe der ATV, Bd. 3, 1974.
- [24] HARTMEIER, W.; BRONN, W. K.; DELLWEG, H.; Neue Erkenntnisse über den Einfluss des O₂-Partialdrucks auf den Stoffwechsel von Mikroorganismen, Chemie-Ing.-Technik, 43. Jahrg., Heft 1+2, S. 76 -78, 1979.
- [25] STAAB, K. F., Ist eine biologische Abwasserreinigung ohne Überschussschlammfall möglich?, Wasser-Abwasser Praxis, Heft 4, 1997, S. 44 – 49.

- [26] ABBASSI, B.; GLIÁCOMAN-VALLEJOS, G.; RÄBIGER, N.; Prozessführung der biologischen Abwasserreinigung mit minimierter Überschussschlammproduktion, Verfahrenstechnik der Abwasser- und Schlammbehandlung, 3. GVC-Kongress, Würzburg, 1996.
- [27] GERMAIN, E.; STEPHENSON, T.; Biomass characteristics, aeration and oxygen transfer in membrane bioreactors: Their interrelations explained by a review of aerobic biological processes, *Environmental Science and Bio/Technology* (2005) 4, S. 223–233.
- [28] KUBIN, K.; Einfluss unterschiedlicher Verfahrenskonzepte auf Substratabbau und Nährstoffverwertung in Membranbelebungsanlagen zur kommunalen Abwasserreinigung, Dissertation, Fakultät III – Prozesswissenschaften, Technischen Universität Berlin, S. 9 und S. 44, 2004.
- [29] YASUI, H.; SHIBATA, M.; An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process, *Water Science Technology*, Vol. 30, No. 9, pp. 11 – 20, 1994.
- [30] SAKAI, Y.; FUKASE, T.; YASUI, H.; SHIBATA, M.; An activated sludge process without excess sludge production, *Water Science Technology*, Vol. 36, No. 11, pp. 163 – 170, 1997.
- [31] MENÉ, R.; LEBRUN, T.; Biolysis: Cutting the edge technology for the reduction of sludge quantities in activated sludge plants; Proceedings of the joint CIWEM and Aqua Enviro Technology Transfer, 7th European Biosolids and Organic Residuals Conference, 18th – 20th November 2002, Wakefield, UK.
- [32] SCHWISTER, K.; Taschenbuch der Umwelttechnik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, S. 260, 2003.